

Différentes stratégies de commande DTC à trois niveaux avec 24 secteurs basée sur les réseaux de neurones artificielle d'un moteur asynchrone de forte puissance

Habib BENBOUHENNI^{1*}

¹Département de Génie Électrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, Algeria

Résumé: La commande directe du couple (DTC) est un type de commande vectorielle pour un onduleur de tension alimentant une machine. Le but de cet article est d'étudier comparative entre quatre stratégies proposées de la DTC trois niveaux à 24 secteurs à base des réseaux de neurones artificielle (RNA) appliquée aux machines asynchrones (MAS). La commande par la technique neuronale permet de réduire les ondulations du couple et du flux statorique. Le principe de fonctionnement détaillé et les résultats de simulation des stratégies DTC-RNA trois niveaux à 24 secteurs proposées pour 1 MW de la MAS sont également discutés.

Mots clés: Machine asynchrone, Commande directe du couple, Réseaux de neurones artificielle, 24 secteurs, Commande vectorielle.

1. Introduction

Les Réseaux de Neurones Artificielles (RNA) sont apparus dans les années 40 lors d'essais de modélisation du neurone biologique [1]. Les RNA sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit [2].

L'utilisation des réseaux de neurones artificiels dans la commande des systèmes électroniques de puissance est à l'ordre du jour. Cette technique a démontré sa puissance dans plusieurs autres disciplines telles que la reconnaissance des formes, le filtrage de signaux et le traitement d'images et la commande des machines électriques et des convertisseurs de puissance [3].

Les structures de contrôle direct du couple des machines sont apparues dans la deuxième moitié des années 1980, exactement en 1986 [4]. Par les deux chercheurs M. Takahachi et I. Depenbork comme concurrentielle des méthodes classiques. Ces derniers sont basés sur une alimentation par modulation de largeur d'impulsions, et sur un découplage du flux et du couple moteur. Le but était d'éliminer le bloc de modulation et les boucles internes en les remplaçant par un tableau de commutation dont les entrées sont les erreurs entre les valeurs de référence et les mesures effectuées.

Le principe de la commande DTC est la régulation directe du couple électromagnétique de la machine, par l'application des différents vecteurs de tension à l'onduleur, qui détermine son état. Les deux variables contrôlées sont : le flux et le couple électromagnétique qui sont habituellement commandés par des comparateurs à hystérésis. IL s'agit de maintenir les grandeurs du flux, et du couple à l'intérieur de ces bandes d'hystérésis. La sortie de ces régulateurs détermine le vecteur de tension optimal à appliquer à chaque instant de commutation [5].

Cette technique implique un fonctionnement de l'onduleur à deux niveaux standard avec une fréquence de commande variable parfois élevée et incompatible avec des applications forte puissance du fait du niveau des pertes par commutation [6].

* Corresponding author.

E-mail: habib0264@gmail.com (Benbouhenni H.).

Address: BP: 50B Ouled Fares, Chlef, Algeria.

Dans cet article, on présentera quatre stratégies de la commande DTC trois niveaux à 24 secteurs de la machine asynchrone à l'aide des réseaux de neurones artificielles, afin d'obtenir une commande robuste augmentant alors la fiabilité, améliorant le rendement énergétique une première partie est consacrée à la présentation de la commande DTC trois niveaux et les stratégies proposées. La deuxième partie de cet article sera consacrée aux applications des réseaux de neurones sur les stratégies proposées de la commande DTC à 24 secteurs. Le but attendu est d'évaluer la stratégie qui donne la meilleure réponse dynamique de la machine asynchrone

2. Commande DTC trois niveaux

L'objectif d'une commande DTC est de maintenir le couple électromagnétique et le module du flux statorique à l'intérieur des bandes d'hystérésis par le choix de la tension de sortie de l'onduleur. Lorsque le couple, ou le module du flux statorique atteint la limite supérieure ou inférieure de l'hystérésis, un vecteur de tension approprié, est appliquée pour ramener la grandeur concernée de sa bande d'hystérésis. Afin d'étudier le principe de base des principales stratégies de contrôle directe de la machine asynchrone, il est indispensable de pouvoir caractériser le comportement des principales variables qui régissent l'état électromagnétique de la machine, à savoir le couple électromagnétique et le flux [7].

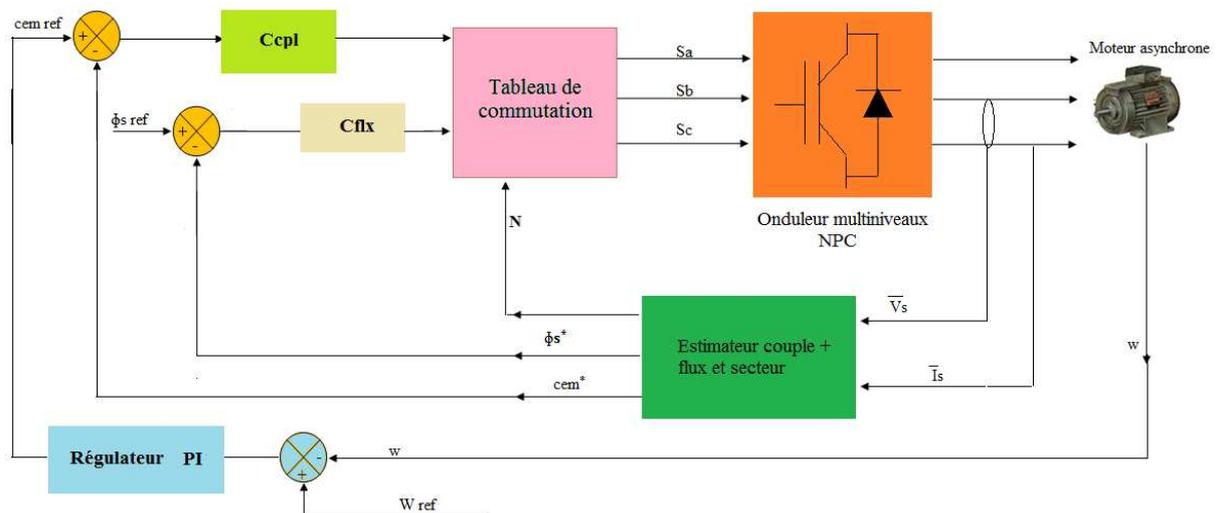


Fig. 1 : Synoptique de la commande DTC

Le flux statorique et le couple électromagnétique sont calculés à partir des équations suivantes [8, 9]:

$$\Phi_s = \sqrt{\Phi_{\alpha s}^2 + \Phi_{\beta s}^2} \quad (1)$$

Avec :

$$\Phi_{\alpha s} = \int_0^t (v_{\alpha s} - R_s i_{\alpha s}) dt \quad (2)$$

$$\Phi_{\beta s} = \int_0^t (v_{\beta s} - R_s i_{\beta s}) dt \quad (3)$$

L'angle θ_s et C_{em} est calculé à partir de:

$$\theta_s = \arctg\left(\frac{\Phi \beta_s}{\Phi \alpha_s}\right) \tag{4}$$

$$c_{em} = \frac{3}{2} p \left[\Phi \alpha_s i \beta_s - \Phi \beta_s i \alpha_s \right] \tag{5}$$

Un onduleur NPC à trois niveaux (Fig. 2) permet d’atteindre 26 positions distinctes dans le plan $(\alpha\beta)$, correspondant aux 27 séquences de vecteur de tension à la sortie de l’onduleur NPC à trois niveaux. Ces positions sont illustrées dans la Fig. 3 [10, 11].

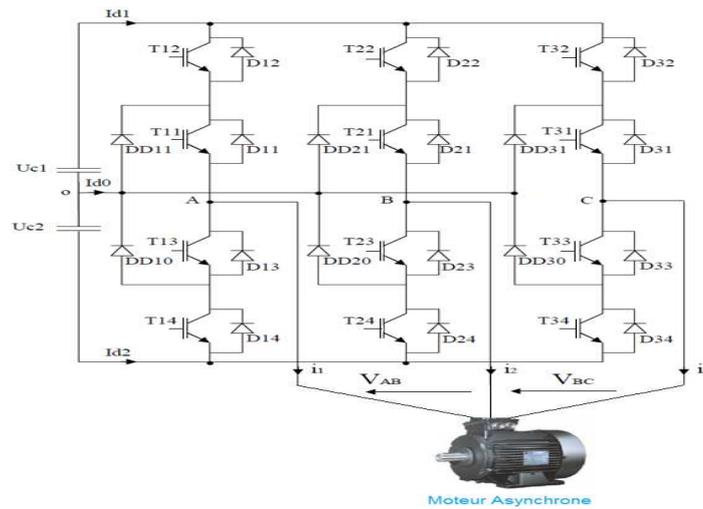


Fig. 2 : Schéma d’un onduleur triphasé à trois niveaux à structure

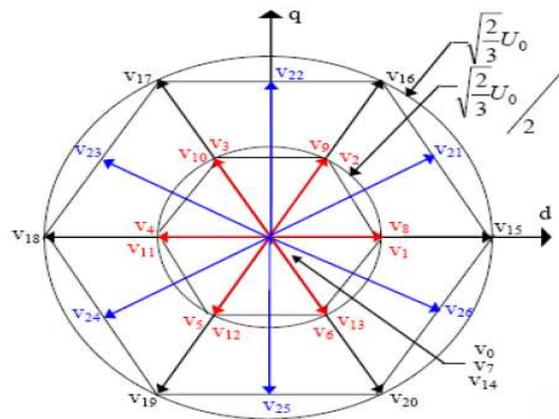


Fig. 3: Vecteurs de tension que peut fournir l’onduleur NPC à 3 niveaux

3. Elaboration des tables de commutation de la commande dtc trois niveaux a 24 secteurs

Afin de réaliser le contrôle direct du flux statorique et du couple de la machine asynchrone pilotée par un onduleur NPC à trois niveaux, j'ai devons élaborer quatre stratégies de commutation mettant en œuvre au mieux les possibilités de l'onduleur.

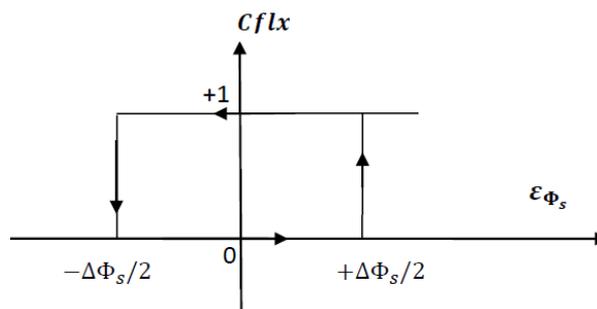
3.1 Stratégie 1 : Cas du contrôleur du couple à 2 niveaux et contrôleur du flux à 2 niveaux

On élabore la table de commutation de la stratégie 1 proposée, en fonction des sortie du contrôleur à hysteresis du flux (Cflx) à 2 niveaux (Fig. 4a), du contrôleur à hysteresis du couple (Ccpl) à 2 niveaux (Fig. 4b), et du secteur N ou position du vecteur flux statorique de la machine.

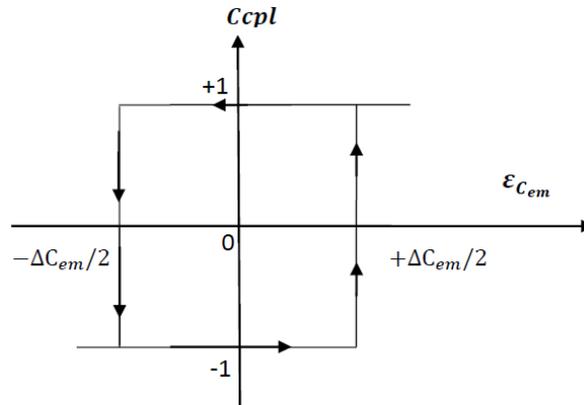
La table de vérité de stratégie 1 et donnée par le Tableau 1.

Tableau 1 : Table de vérité de stratégie 1

N	Cflx			
	1		0	
	Ccpl			
	1	-1	1	-1
1	22	0	17	14
2	22	0	17	14
3	17	14	23	0
4	17	14	23	0
5	23	0	18	14
6	23	0	18	14
7	18	14	24	0
8	18	14	24	0
9	24	0	19	14
10	24	0	19	14
11	19	14	25	0
12	19	14	25	0
13	25	0	20	14
14	25	0	20	14
15	20	14	26	0
16	20	14	26	0
17	26	0	15	14
18	26	0	15	14
19	15	14	21	0
20	15	14	21	0
21	21	0	16	14
22	21	0	16	14
23	16	14	22	0
24	16	14	22	0



a) Flux statorique



b) Couple

Fig. 4 : Comparateurs à hysteresis Pour la stratégie 1.

3.2 Stratégie 2 : Cas du contrôleur du couple à 3 niveaux et contrôleur du flux à 2 niveaux

Dans notre cas on utilisé un comparateur à hystérésis à trois niveaux pour le couple (Fig. 5) et à deux niveaux pour la régulation du flux (Fig. 4a) avec 24 secteurs. La table de vérité et donnée par Tableau 2.

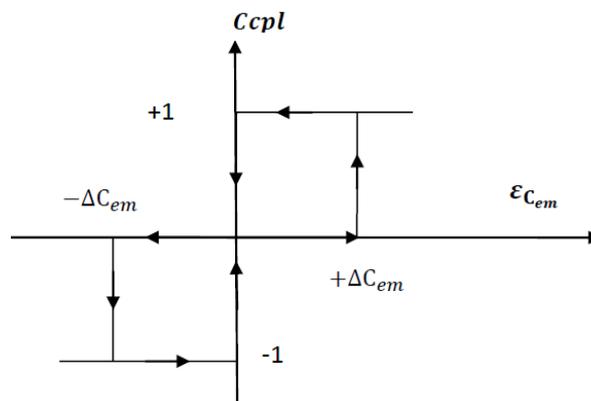


Fig. 5 : Comparateur à hystérésis à trois niveaux pour le couple.

3.3 Stratégie 3 : Cas du contrôleur du couple à 5 niveaux et contrôleur du flux à 2 niveaux

Pour la stratégie 3, on utilisé un comparateur à hystérésis à cinq niveaux pour le couple (Fig. 6) et à deux niveaux pour la régulation du flux (Fig. 4a) avec 24 secteurs. La table de vérité et donnée par Tableau 3.

Tableau 2 : Table de vérité de stratégie 2

N	Cflx					
	1			0		
	Ccpl					
	1	0	-1	1	0	-1
1	16	8	20	17	11	19
2	16	8	20	17	11	25
3	22	9	26	23	12	25
4	22	9	26	23	12	20
5	17	9	15	18	12	20
6	17	9	15	18	12	26
7	23	10	21	24	13	26
8	23	10	21	24	13	15
9	18	10	16	19	13	15
10	18	10	16	19	13	21
11	24	11	22	25	8	21
12	24	11	22	25	8	16
13	19	11	17	20	8	16
14	19	11	17	20	8	22
15	25	12	23	26	9	22
16	25	12	23	26	9	17
17	20	12	18	15	9	17
18	20	12	18	15	9	23
19	26	13	24	21	10	23
20	26	13	24	21	10	18
21	15	13	19	16	10	18
22	15	13	19	16	10	24
23	21	8	25	22	11	24
24	21	8	25	22	11	16

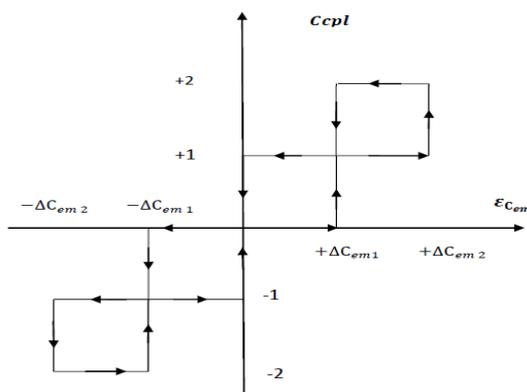


Fig. 6 : Comparateur à hystérésis à cinq niveaux pour le couple

Tableau 3 : Table de vérité de stratégie 3

N	Cflx									
	0					1				
	Ccpl									
	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2
1	25	5	0	3	17	20	13	0	2	22
2	25	5	0	3	17	20	13	0	2	22
3	20	6	7	4	23	26	8	7	3	17
4	20	6	7	4	23	26	8	7	3	17
5	26	13	14	11	18	15	1	14	10	23
6	26	13	14	11	18	15	1	14	10	23
7	15	8	0	12	24	21	2	0	11	18
8	15	8	0	12	24	21	2	0	11	18
9	21	1	7	5	19	16	9	7	4	24
10	21	1	7	5	19	16	9	7	4	24
11	16	2	14	6	25	22	10	14	5	19
12	16	2	14	6	25	22	10	14	5	19
13	22	9	0	13	20	17	3	0	12	25
14	22	9	0	13	20	17	3	0	12	25
15	17	10	7	8	26	23	4	7	13	20
16	17	10	7	8	26	23	4	7	13	20
17	23	3	14	1	15	18	11	14	6	26
18	23	3	14	1	15	18	11	14	6	26
19	18	4	0	2	21	24	12	0	1	15
20	18	4	0	2	21	24	12	0	1	15
21	24	11	7	9	16	19	5	7	8	21
22	24	11	7	9	16	19	5	7	8	21
23	19	12	14	10	22	25	6	14	9	16
24	19	12	14	10	22	25	6	14	9	16

3.4 Stratégie 4 : Cas du contrôleur du couple à 5 niveaux et contrôleur du flux à 3 niveaux

Dans notre cas on utilisé un comparateur à hystérésis à cinq niveaux pour le couple (Fig. 6) et à trois niveaux pour la comparateur à hysteresis du flux (Fig. 7). La table de vérité de stratégie 4 et donnée par le Tableau 4.

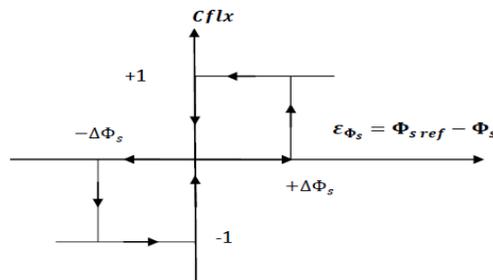


Fig. 7 : Comparateur à hystérésis à trois niveaux pour le flux

Tableau 4 : Table de vérité de stratégie 4

N	Cflx														
	-1					0					+1				
	Ccpl														
	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2
1	19	5	0	3	17	25	25	0	22	22	26	26	0	21	21
2	19	5	0	3	17	25	25	0	22	22	26	26	0	21	21
3	25	25	7	23	23	20	6	7	3	17	15	1	7	2	16
4	25	25	7	23	23	20	6	7	3	17	15	1	7	2	16
5	20	6	14	4	18	26	26	14	23	23	21	21	14	22	22
6	20	6	14	4	18	26	26	14	23	23	21	21	14	22	22
7	26	26	0	24	24	15	1	0	4	18	16	2	0	3	17
8	26	26	0	24	24	15	1	0	4	18	16	2	0	3	17
9	15	1	7	5	19	21	21	7	24	24	22	22	7	23	23
10	15	1	7	5	19	21	21	7	24	24	22	22	7	23	23
11	21	21	14	25	25	16	2	14	5	19	17	3	14	4	18
12	21	21	14	25	25	16	2	14	5	19	17	3	14	4	18
13	16	2	0	6	20	22	22	0	25	25	23	23	0	24	24
14	16	2	0	6	20	22	22	0	25	25	23	23	0	24	24
15	22	22	7	26	26	17	3	7	6	20	18	4	7	5	19
16	22	22	7	26	26	17	3	7	6	20	18	4	7	5	19
17	17	3	14	1	15	23	23	14	26	26	24	24	14	25	25
18	17	3	14	1	15	23	23	14	26	26	24	24	14	25	25
19	23	23	0	21	21	18	4	0	1	15	19	5	0	6	20
20	23	23	0	21	21	18	4	0	1	15	19	5	0	6	20
21	18	4	7	2	16	24	24	7	21	21	25	25	7	26	26
22	18	4	7	2	16	24	24	7	21	21	25	25	7	26	26
23	24	24	14	22	22	19	5	14	2	16	20	6	14	1	15
24	24	24	14	22	22	19	5	14	2	16	20	6	14	1	15

4. Commande DTC neuronale (DTC-RNA)

Les réseaux de neurones sont des modèles mathématiques et informatiques, des assemblages d'unités de calcul appelés neurones formels, et l'inspiration originale était le fonctionnement cérébral de l'être humain [12].

Un neurone formel ou artificielle (Fig. 8) est un processeur très simple (Simulé sur ordinateur ou réalisée sur circuit intégré) imitant grossièrement la structure et le fonctionnement d'un neurone biologique. C'est un automate binaire qui réalise une somme pondérée de ses entrées [13].

La structure de commande neuronale directe du couple (DTC-RNA), de la machine asynchrone est représentée par la Fig. 9. La table de commutation sont remplacée par un contrôleur neuronal, et les entrées sont Ccpl du couple, et Cflx du flux, et la position (zone)

du flux statorique $Z(i)$, et les sorties sont les impulsions S_a, S_b, S_c permettant la commande des interrupteurs de l'onduleur [14, 15].

Pour générer le contrôleur RNA par Matlab/Simulink ou on à choisi 30 couches cachées et 3 couches de sorties avec les fonctions d'activation respectivement de type « tansig » et « purelin ».

La mise à jour des poids et des biais de ce réseau est réalisés par un algorithme de retropropagation nommé l'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM).

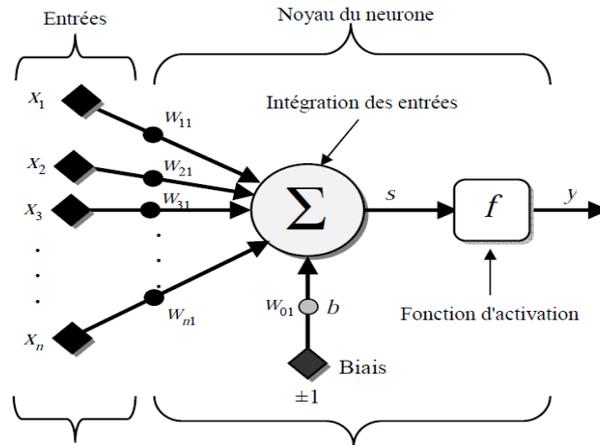


Fig. 8 : Modèle d'un neurone artificiel.

La Fig. 10 représenté la structure interne du contrôleur neuronale de la commande DTC.

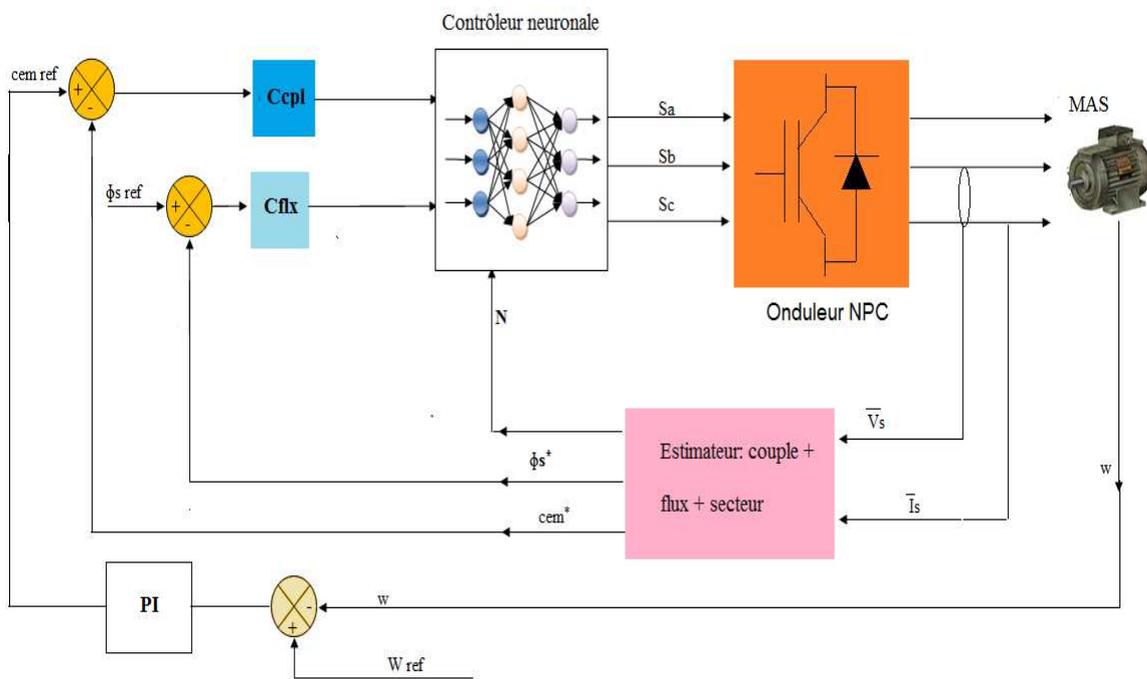


Fig. 9 : Commande DTC neuronale

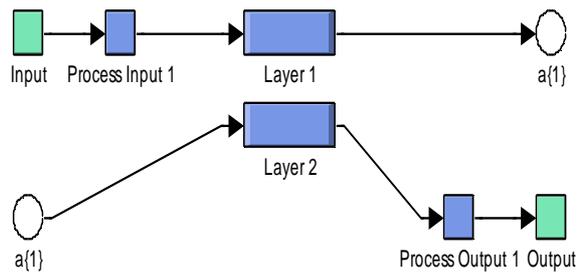


Fig. 10 : Structure interne du contrôleur neuronale

Les layers sont donnés dans les Figures. 11-12.

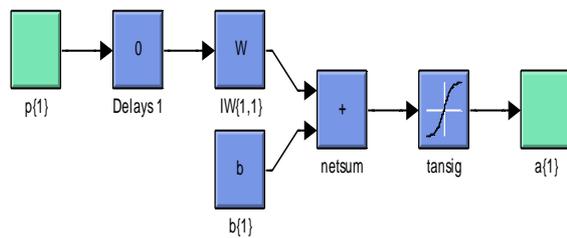


Fig. 11 : Structure interne de layer 1

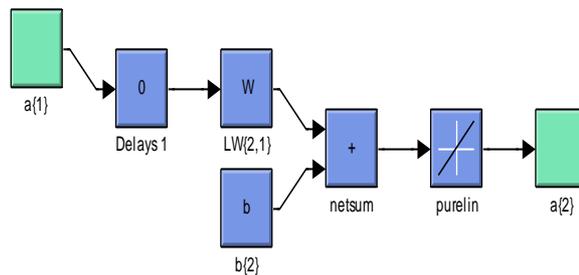


Fig. 12 : Structure interne de layer 2

5. Resultats de simulation

Pour illustrer le fonctionnement de la commande et réaliser les études prospective, un modèle de simulation développée dans l'environnement fourni par Matlab/Simulink, une application développée dans l'environnement fourni par Matlab /Simulink.

Les résultats de simulation des stratégies proposées de la commande DTC trois niveaux à 24 secteurs basée sur les RNA de la MAS de forte puissance, sont illustrés dans les Figures 13, 14, 15, et 16.

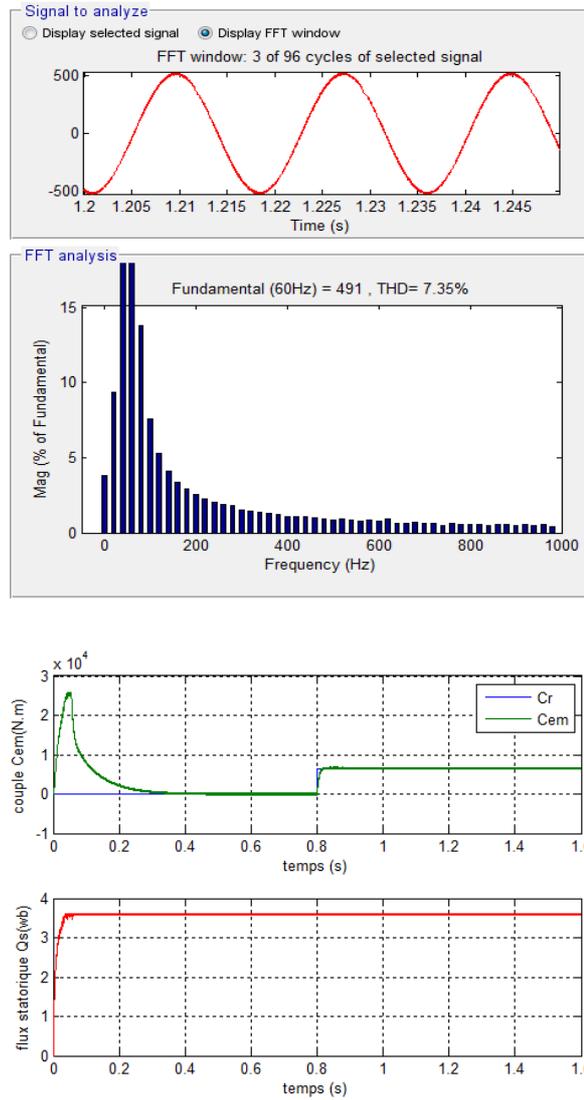
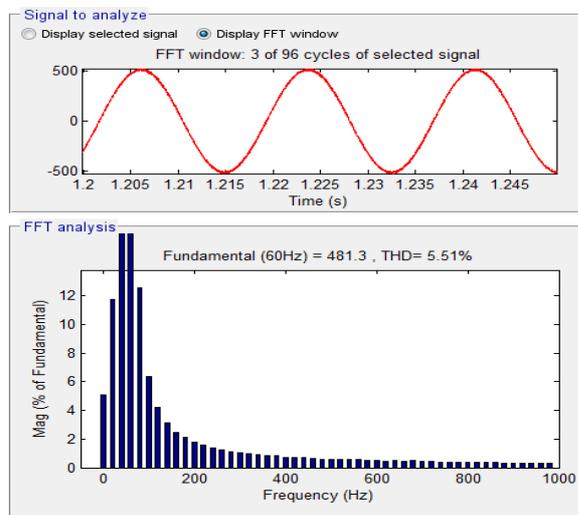


Fig. 13 : Performances de la stratégie 1 appliquée à la MAS



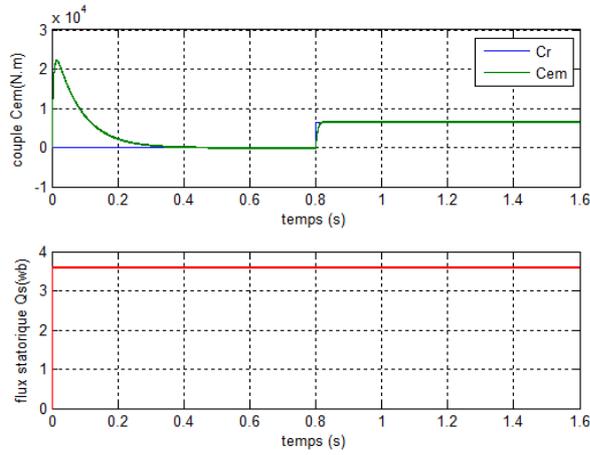


Fig. 14 : Performances de la stratégie 2 appliquée à la MAS.

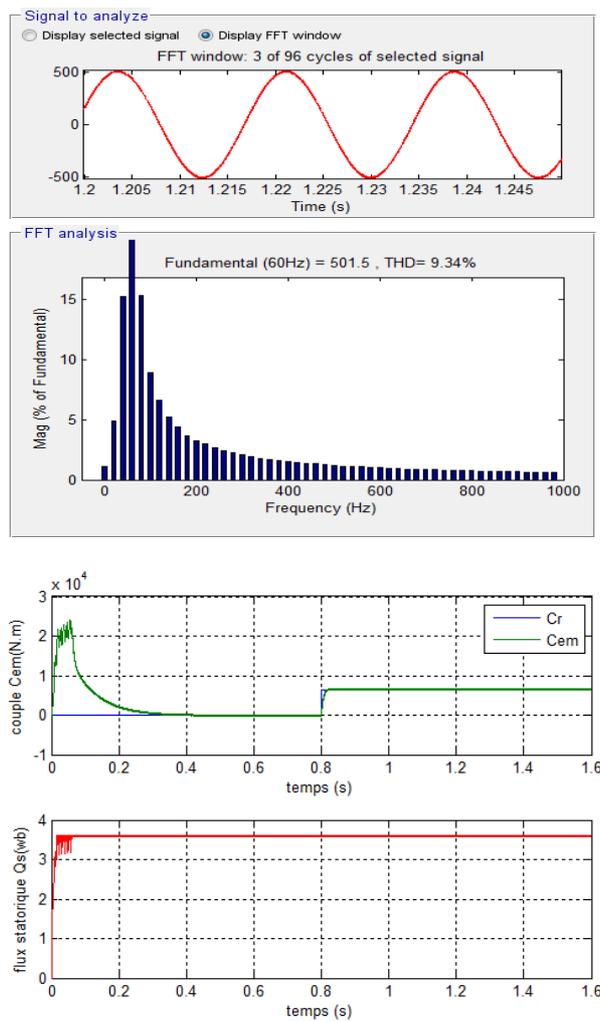


Fig. 15 : Performances de la stratégie 3 appliquée à la MAS

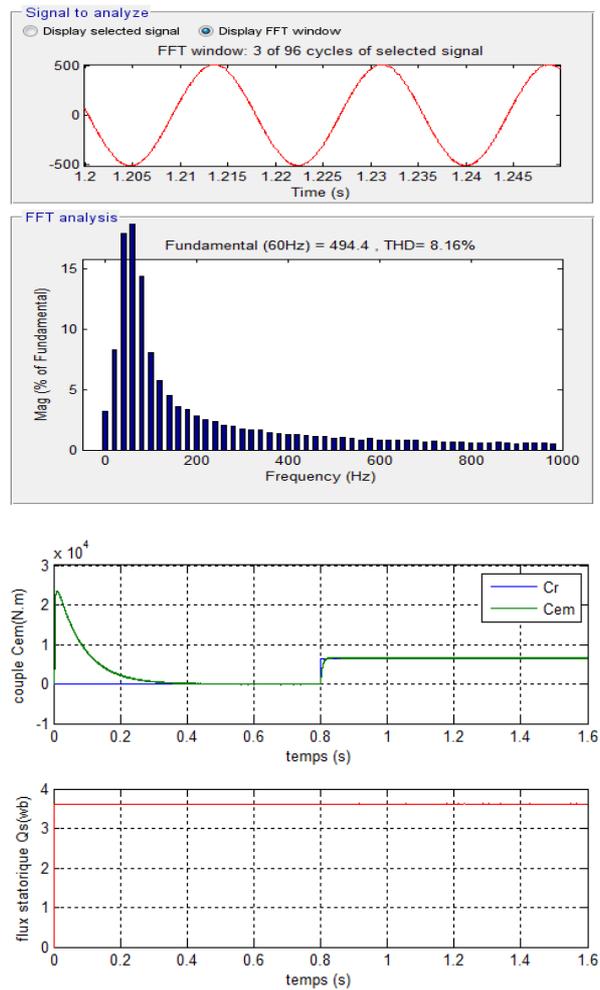
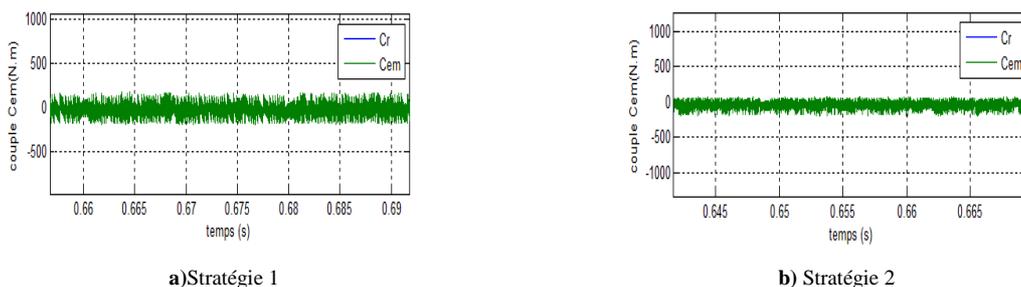


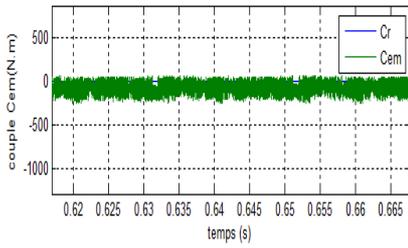
Fig. 16 : Performances de la stratégie 4 appliquée à la MAS.

La Fig. 17 représente le zoom du couple pour les 4 stratégies proposées. Dans cette figure, la stratégie 4 réduit considérablement l'ondulation du couple par rapport à les autres stratégies de la commande DTC à trois niveaux avec 24 secteurs.

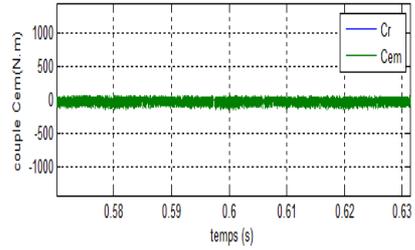
La Fig. 18d montre que l'utilisation de stratégie 4 entraîne une diminution des ondulations du flux statorique de la machine asynchrone.

La Fig. 19 représente la réponse dynamique du flux. La stratégie 4 donne le meilleur temps de réponses par rapport des autres stratégies.



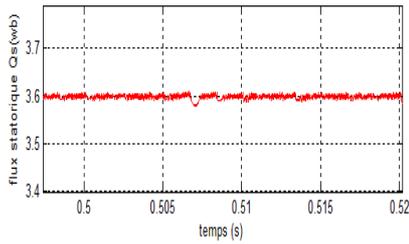


c) Stratégie 3

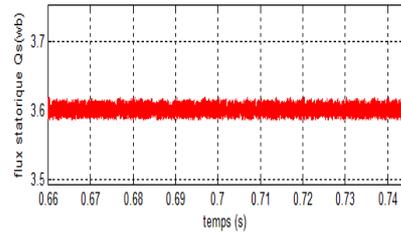


d) Stratégie 4

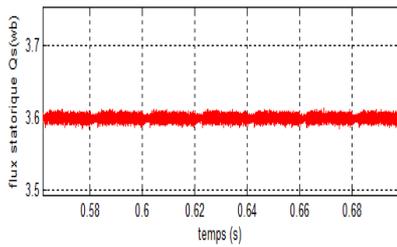
Fig. 17 : Zoom du couple



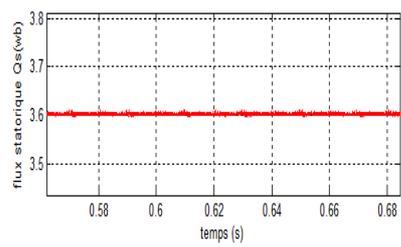
a) Stratégie 1



b) Stratégie 2

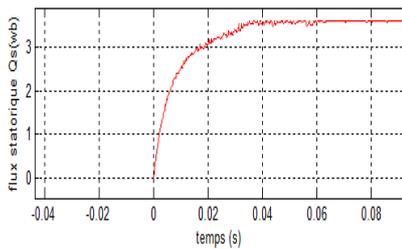


c) Stratégie 3

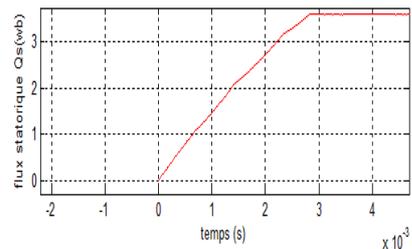


d) Stratégie 4

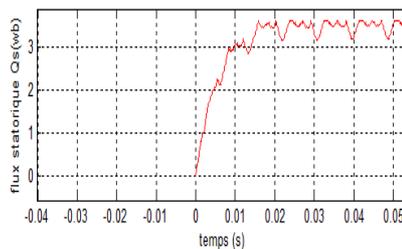
Fig. 18 : Zoom du flux



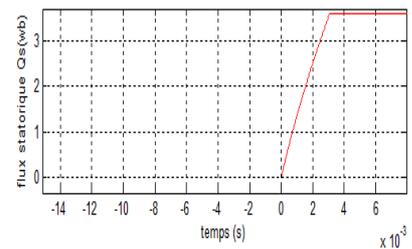
a) Stratégie 1



b) Stratégie 2



c) Stratégie 3



d) Stratégie 4

Fig. 19 : Réponses dynamique du flux statorique.

6. Conclusion

Cet article a présenté une comparaison entre quatre stratégies de la commande DTC trois niveaux à 24 secteurs à base des réseaux de neurones d'une machine asynchrone. Ce travail a également présenté la description des quartes stratégies et leurs principes de fonctionnement. Afin de montrer les performances de chaque stratégie pour des conditions constantes, des résultats de simulation ont été avancés. En conclusion, la stratégie 4 réduit considérablement les ondulations du couple électromagnétique, ondulation du flux. D'un autre coté la stratégie 4 présente une meilleure réponse dynamique du flux statorique par rapport aux résultats obtenus dans les stratégies 1, 2 et 3. Ce qui montre l'efficacité de la stratégie proposée.

Appendix

Tableau 5 Model parameters

Parameter	Value
Puissance Nominale	$P_n=1\text{MW}$
Résistance Statorique	$R_s = 0.228\Omega$
Résistance Rotorique	$R_r = 0.332\Omega$
Inductance Statorique	$L_s = 0.0084\text{H}$
Inductance Rotorique	$L_r = 0.0082\text{H}$,
Inductance Mutuelle L_m	$L_m = 0.0078\text{H}$
Number De Paire De Pole	$p = 3$
Moment D'inertie	$J = 20\text{kg.m}^2$
Coefficient De Frottement	$K_f = 0.008\text{Nm.s.rad}^{-1}$
Tension Nominale	$V_n=791\text{v}$
Fréquence	$F_s=60\text{Hz}$

7. Références

- [1] N. K. Nguyen, « Approche neuromimétique pour l'identification et la commande des systèmes électriques: application au filtrage actif et aux actionneurs synchrones, » Thèse de Doctorat, université de haute –Alsace, Ecole Doctorate Jean-Henri Lambert, 2010.
- [2] A. Chaiba, « Commande de la machine asynchrone à double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle, »Thèse de Doctorat en Sciences, université de Batna, 2010.
- [3] K. Nadir, « Amélioration des performances de la commande d'un moteur asynchrone à cage et élaboration d'un estimateur universel de ses paramètres en utilisant les réseaux de neurones artificiels, » Thèse de Doctorat, université de Boumerdes, 2007.
- [4] A. Manuel, J. Francis, « Simulation of direct torque controlled induction motor drive by using space vector pulse width modulation for torque ripple reduction, » International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 2, Issue 9, September 2013.
- [5] H. Benbouhenni, R. Taleb, « Nouveaux tableaux de commutations de la commande DTC d'une MAS alimentée par onduleur NPC à trois niveaux, » Proceedings of Engineering and Technology (PET), Vol. 14, pp. 123-128, 2016.
- [6] B. Elakhdar, « Commande directe du couple flou et neuronale d'un moteur synchrone à double étoile sans capteur mécanique alimenté par onduleurs multiniveaux, » Thèse Doctorat en Sciences, université Djillali Liabes, Sidi Bel Abbés, 2015.

- [7] H. Benbouhenni, R. Taleb, H. Mellah, «Techniques neuromimétiques pour la correction d'ondulations du couple et du flux de la DTC sept niveaux à 6 secteurs d'une machine asynchrone, » Proceedings of Engineering and Technology, Vol. 24, pp. 24-32, 2017
- [8] S. Meziane, R. Toufouti, H. Benalla, «Etude comparative entre la DTC deux niveaux et la DTC trois niveaux de la machine asynchrone, » Communication Science et Technologie, Vol. 7, Janvier 2009.
- [9] H. Yantour, J. Saadi, A. Khoumri, « Modilisation et simulation d'une commande directe du couple appliquée à la machine asynchrone (DTC), » 6^{ème} Conférence Francophone de Modélisation et Simulation-MOSIM'06, Rabat, Maroc, du 3 au 5 Avril 2006.
- [10] B. Sebti, « Commande par DTC d'un moteur asynchrone apport des réseaux de neurones, » Mémoire de Magister, université de Batna, 2013.
- [11] L. Benalia, « Commande en tension des moteurs à induction double alimentés, » Mémoire de Magister, université de Batna, 2010.
- [12] B. Abdelhakim, « Metaheuristiques hybride réseaux de neurones artificielle-PSO du recuit simulé pour la commande d'un procédé industriel non-linéaire, » Mémoire de Magister, université de Batna, 2013.
- [13] D. Youcef, « Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolienne par les techniques de l'intelligence artificielle, » Thèse de Doctorat en Science, université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbés, 2015.
- [14] T. Riad, «Contribution à la commande directe de couple d'une machine asynchrone triphasée, » Thèse de Doctorat, université de Mentouri, Constantine, 2008.
- [15] H. Benbouhenni, «Commande directe du couple par les techniques de l'intelligence artificielle d'un moteur asynchrone (1MW) alimentée par onduleur NPC de tension à sept niveaux, » Journal of Advanced Research in Science and Technology, Vol. 5, No.1, pp. 680-696, 2018.